

ANALISA KARAKTERISASI *BIO-OIL* HASIL PIROLISIS LIMBAH BANNER DAN CAMPURAN DENGAN LIMBAH SERBUK GERGAJI

CHARACTERIZATION ANALYSIS OF *BIO-OIL* PRODUCED FROM THE PYROLYSIS OF BANNER WASTE AND MIXTURE WITH SAWDUST WASTE

Lutfi Firmansyah^{1*}, Zahrul Mufrodi¹, Maryudi¹, Erna Astuti¹, Deny Ismanto²

¹Department of Master Chemical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Ahmad Dahlan University

Jl. Ahmad Yani (Ringroad Selatan) Tamanan Banguntapan, Bantul, Yogyakarta, Indonesia

²Departemnt of Management, Faculty of Economics and Business, Ahmad Dahlan University

Jl. Kapas No. 9, Yogyakarta, Indonesia

*email : lutfi.firmansyah04@gmail.com

(Received: 2025 11, 27; Reviewed: 2025 12, 9; Accepted: 2025 12, 10)

Abstrak

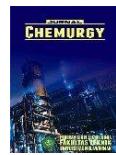
Peningkatan limbah banner berbahan PVC dan serbuk gergaji dari industri kayu menimbulkan masalah lingkungan. Namun timbulan masalah tersebut terdapat potensi sebagai sumber energi alternatif. Penelitian ini bertujuan mengonversi kedua limbah tersebut menjadi *bio-oil* melalui proses pirolisis. Produk *bio-oil* kemudian diuji karakteristik fisik serta kimianya. Proses dilakukan menggunakan jenis reaktor *fixed-bed* pada temperatur operasi 300–500 °C dengan interval 50°C. Analisis TGA digunakan untuk mempelajari dekomposisi bahan, sedangkan GC–MS untuk mengidentifikasi senyawa penyusun *bio-oil*.

Hasil menunjukkan dekomposisi utama limbah banner terjadi pada 285 °C dan serbuk gergaji pada 338 °C dengan rentang optimum pirolisis antara 300–400 °C. Yield *bio-oil* menurun dari 22,34% menjadi 1,12% seiring kenaikan suhu, sedangkan *syngas* meningkat dari 10,47% menjadi 38,44%. Komposisi kimia bergeser dari senyawa ester pada suhu rendah menjadi fenolik dan aromatik kompleks pada suhu tinggi. Kondisi optimum tercapai pada 400 °C dengan densitas 1,07 kg/m³, viskositas 1,15 cP, dan nilai kalor 23,5 MJ/kg. Bahan baku dengan campuran 75% banner dan 25% serbuk gergaji menghasilkan *bio-oil* lebih stabil dengan dominasi senyawa aromatik oksigenat. Secara keseluruhan, pirolisis limbah banner maupun campuran dengan serbuk gergaji berpotensi sebagai solusi pengelolaan limbah. Baik berjenis plastik maupun biomassa yang memberikan hasil berupa bahan bakar alternatif.

Kata Kunci: *Bio-Oil*, Biomassa, Pirolisis, Plastik, Sampah

Abstract

*The increasing accumulation of PVC-based banner waste and sawdust from the wood industry has become an environmental concern. However, these wastes hold significant potential as alternative energy sources. This study aims to convert both wastes into *bio-oil* through the pyrolysis process and evaluate its physical and chemical characteristics. The experiments were carried out using a fixed-bed reactor operated at temperatures*



ranging from 300 to 500°C with 50°C intervals. Thermogravimetric analysis (TGA) was employed to investigate the thermal decomposition behavior, while gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) was used to identify the chemical composition of the bio-oil.

The results show that the main decomposition of banner waste occurred at 285°C, while sawdust decomposed at 338 °C, with the optimum pyrolysis range found between 300 and 400°C. The bio-oil yield decreased from 22.34% to 1.12% as the temperature increased, whereas syngas production rise from 10.47% to 38.44%. The chemical composition shifted from esters at lower temperatures to phenolic and complex aromatic compounds at higher ones. The optimum condition was achieved at 400°C, producing bio-oil with a density of 1.07 kg/m³, viscosity of 1.15 cP, and heating value of 23.5 MJ/kg.

Keywords: Bio oil, Biomass, Plastic, Pyrolysis, Waste

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global terus meningkat seiring pertumbuhan aktivitas manusia dan industri. Disisi lain ketergantungan pada bahan bakar fosil semakin meningkat. Sehingga memberikan efek samping terhadap lingkungan seperti peningkatan emisi di udara dan peristiwa efek rumah kaca. Sejalan dengan kondisi tersebut, volume limbah plastik dari berbagai kegiatan ekonomi dan sosial juga terus bertambah (Idris et al., 2024). Salah satunya limbah banner kampanye yang selalu membanjiri ruang publik setiap kali musim pemilu tiba di Indonesia. Kajian terbaru menunjukkan bahwa atribut kampanye berbasis bahan cetak khususnya banner, menyumbang beban lingkungan yang cukup signifikan dan memerlukan sistem pengelolaan yang lebih berkelanjutan (Silaen, 2024).

Di sisi lain industri kayu di Indonesia juga menjadi penyumbang limbah dalam jumlah besar berupa serbuk gergaji. Limbah serbuk gergaji yang dihasilkan sering kali tidak dimanfaatkan secara optimal. Padahal limbah banner dan serbuk gergaji memiliki potensi energi yang besar apabila diolah dengan tepat. Secara material, banner kampanye umumnya dibuat dari PVC flex berbasis polivinil klorida. Material tersebut memiliki harga yang murah, tahan cuaca, namun sulit terurai di alam. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sebagian besar limbah banner berakhir di TPA, dibakar terbuka, atau ditimbun, sehingga meningkatkan pada pencemaran dan jejak karbon (Saatcioglu & Venkatraman, 2024).

Salah satu alternatif untuk pengolahan limbah baik berjenis plastik maupun biomassa adalah proses pirolisis. Pirolisis adalah proses dekomposisi termal tanpa kehadiran oksigen yang mampu mengubah polimer maupun biomassa menjadi fraksi cair (*bio-oil*), gas (*syngas*) dan padatan (*bio-char*). Sejumlah studi telah membuktikan bahwa proses pirolisis mampu secara efektif untuk memproses plastik maupun campuran dengan biomassa bahkan berpotensi menghasilkan produk bernilai ekonomi. Meskipun produk yang dihasilkan bergantung pada jenis bahan, kondisi operasi, dan tahap pasca-proses (Petrik et al., 2025).

Tantangan utama muncul pada material berbasis PVC. Hal ini dikarenakan saat proses pemanasan PVC melepaskan gas HCl yang dapat menurunkan rendemen minyak, menimbulkan korosi pada reaktor serta berdampak pada kesehatan. Beberapa penelitian terkini melaporkan kemajuan metode deklorinasi melalui kopirolisis dengan senyawa basa kalsium yang mampu menekan pembentukan HCl secara signifikan (Tian et al., 2024).

Kondisi yang terjadi di Indonesia dimana produksi *banner* meningkat pesat selama masa kampanye pemilu terjadi dalam waktu singkat. Hal itu menyebabkan kondisi pasca pemilu, dimana sebagian besar banner bekas kampanye hanya dikumpulkan dan dibuang ke TPA tanpa proses lanjutan. Hal tersebut menyebabkan permasalahan limbah yang terus berulang. Sehingga dengan kondisi tersebut membuka peluang besar untuk menerapkan teknologi konversi termokimia seperti pirolisis dalam proses pengolahannya. Sehingga tidak hanya dapat mengurangi timbulan sampah tetapi juga menghasilkan sumber energi alternatif. Alternatif pengolahan menggunakan pirolisis menjadi proses yang sejalan dengan meningkatnya perhatian global terhadap konsep “pemilu hijau”. Sehingga diharapkan pada pemilu yang akan datang dapat penerapan sistem pengelolaan limbah kampanye yang terukur, berorientasi ekonomi sirkular, dan mudah diimplementasi.

Kombinasi limbah banner bekas kampanye dan serbuk gergaji kayu sebagai bahan baku pirolisis untuk dijadikan bahan bakar alternatif menarik untuk dilakukan. Hal ini dikarenakan proses pirolisis menggunakan kedua bahan tersebut dapat saling melengkapi. Dimana serbuk gergaji berperan sebagai sumber karbon dan hidrogen alami, sementara limbah plastik berjenis banner menyumbang fraksi hidrokarbon yang memperkaya kandungan energi minyak pirolisis. Penelitian-penelitian terbaru menunjukkan bahwa co-pirolisis plastik dan biomassa dapat menghasilkan *bio-oil* dengan kandungan hidrokarbon lebih tinggi dan kadar oksigen lebih rendah, sehingga lebih stabil dan bernilai ekonomi (Khatibi et al., 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini yang berjudul “Analisa Karakterisasi *Bio-oil* Hasil Pirolisis Limbah Banner dan Campuran dengan Limbah Serbuk Gergaji” dilakukan. Studi ini berupaya memanfaatkan limbah banner pasca-pemilu dan serbuk gergaji dari industri kayu sebagai bahan baku pirolisis. Hasil pirolisis berupa *bio-oil* kemudian dianalisa karakteristik senyawa yang dihasilkan maupun aspek fisik dan kimia. Analisis dilakukan menggunakan metode yang lazim dalam penelitian serupa, salah satunya dengan Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS) untuk mengidentifikasi senyawa utama penyusun *bio-oil* (Sorino et al., 2025).

2. METODOLOGI

2.1 Bahan Baku

Limbah Banner

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah banner bekas kampanye yang sudah tidak terpakai. Banner tersebut dipilih karena ketersediaannya yang melimpah setelah masa pemilu berakhir dan kandungan polimernya yang potensial untuk dikonversi menjadi produk bernilai, seperti *bio-oil*. Sebelum digunakan dalam proses pirolisis, limbah banner terlebih dahulu melalui tahap pembersihan untuk menghilangkan debu, tanah, dan sisa kotoran lain yang menempel di permukaan. Setelah bersih, banner kemudian dipotong menjadi potongan-potongan kecil agar ukurannya seragam dan lebih mudah mengalami proses pemanasan saat pirolisis berlangsung. Tahapan persiapan ini dilakukan untuk memastikan bahan berada dalam kondisi optimal sehingga proses dekomposisi termal dapat berlangsung secara efisien dan menghasilkan produk yang lebih homogen.

Serbuk Gergaji

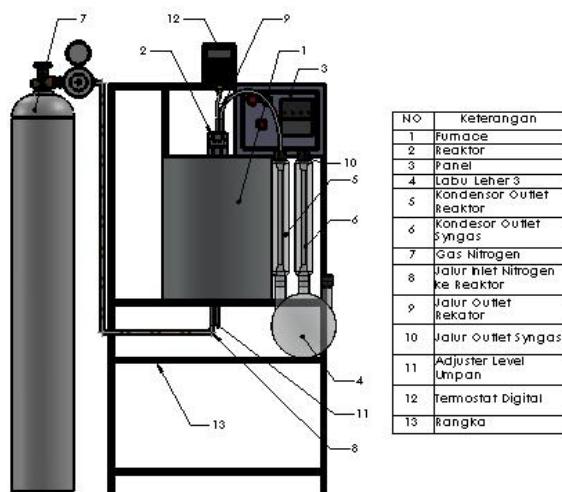
Bahan tambahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk gergaji yang diperoleh dari sisa proses pemotongan dan penghalusan kayu pada industri pengrajin maupun pabrik pengolahan kayu. Serbuk gergaji dipilih karena ketersediaannya yang melimpah di Indonesia, mengingat negara ini merupakan salah satu produsen dan eksportir produk kayu terbesar di dunia.

Sebelum digunakan, serbuk gergaji dikeringkan terlebih dahulu untuk menurunkan kadar airnya agar tidak menghambat proses pirolisis dan mengurangi pembentukan uap berlebih. Selain itu, ukuran partikel serbuk juga diseragamkan untuk memastikan proses pemanasan dan reaksi termal berlangsung lebih merata.

Penambahan serbuk gergaji pada proses pirolisis diharapkan dapat memberikan efek sinergis dengan limbah banner. Biomassa kayu yang kaya akan karbon dan hidrogen dapat membantu meningkatkan kualitas *bio-oil* yang dihasilkan, baik dari segi stabilitas maupun kandungan energinya.

2.2 Alat dan Cara Kerja

Proses pirolisis limbah banner maupun campuran antara limbah banner dan serbuk gergaji menggunakan jenis *fixed-bed reactor pyrolysis*. Dimensi dari reaktor berdiameter dalam 50 mm dan tinggi 200 mm yang terdapat lubang dibawah dan diatas reaktor. Lubang bawah reaktor berfungsi untuk mengalirkan gas Nitrogen dengan tujuan agar oksigen didalam reaktor terbawa ke aliran luar sebelum dilakukan proses pirolisis (proses *flashing* reaktor). Dan fungsi lubang atas pada reaktor berfungsi untuk mengalikan *volatile* (*syngas* maupun *bio oil*) yang terbentuk pada proses pirolisis. *Volatile* yang terbentuk dan mengalir ke lubang atas reaktor kemudian masuk ke dalam sistem kondensor untuk mengkondensasi gas *condensable*. *Bio oil* yang terbentuk kemudian terpisah pada labu leher 3 dan gas yang bersifat *non-condensable* mengalir ke luar. Sistem konfigurasi dari rangkaian alat pirolisis ditampilkan pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Rangkaian Alat Pirolisis

Pemanasan reaktor pada proses pirolisis menggunakan furnace berbentuk silinder dengan daya 2000 watt. Pada proses percobaan pirolisis menggunakan variasi temperatur operasi didalam reaktor dari 300°C hingga 500°C. Pada saat pengoperasian, suhu dijaga stabil dengan menggunakan *thermocontrol* digital yang terhubung dengan sensor suhu didalam *furnace*. Dan terdapat termometer digital untuk mengetahui temperatur operasi didalam *furnace*.

2.3 Analisa Bahan Baku dan Produk Pirolisis

- *Thermal Gravimetric Analysis (TGA)*

Analisis *Thermal Gravimetric Analysis* (TGA) beserta *Derivative termogravimetri* (DTG) dipakai untuk mengamati bagaimana suatu bahan polimer maupun organik kehilangan massa saat dipanaskan (proses dekomposisi), sehingga sangat berguna untuk mempelajari proses termal dan kinetika degradasi. Dengan mencatat perubahan massa terhadap suhu dan waktu, TGA membantu memahami tahap-tahap dekomposisi yang berlangsung dan memberikan data praktis yang penting untuk merancang atau mengoptimalkan proses pirolisis. Dalam pengujian ini, sampel dianalisis menggunakan alat TGA model detector DTG-60A TGA701 yang terdapat pada Laboratorium Kimia Instrumen Universitas Pendidikan Indonesia. Contoh uji dipanaskan hingga 550°C dengan laju pemanasan 5 °C per menit, dan hasilnya dipakai untuk menilai perilaku termal serta kestabilan material selama pemanasan.

- **GC-MS-Analysis**

GC-MS merk Shimadzu GCMS dengan tipe GC-2010 menggunakan kolom berjenis Restex Rtx 5MS yang terdapat pada Laboratorium Penelitian Terpadu dan Pengujian Universitas Ahmad Dahlan digunakan untuk menganalisa *bio oil* hasil pirolisis. Suhu injektor GC diatur pada 280 °C dengan rasio pembelahan 20:1. Program pemanasan dimulai dari suhu 70°C, ditahan selama 3 menit, kemudian dinaikkan hingga 280 °C. Suhu antarmuka GC-MS diatur pada 280 °C, sedangkan suhu sumber ion spektrometer massa ditetapkan pada 225 °C. Proses pemindaian dilakukan pada rentang m/z 50–550, sehingga memungkinkan identifikasi senyawa organik utama yang terkandung dalam *bio oil* pirolisis.

- **Sifat Fisik *Bio oil***

Pengujian sifat fisik *bio oil* dilakukan pengukuran berupa densitas dan viskositas. Pengukuran densitas digunakan alat ukur berupa piknometer dengan volume 5 ml. Sedangkan pengukuran kekentalan/viskositas dilakukan dengan viscometer Ostwald. Pengukuran densitas dan viskositas dilakukan pada suhu ruang (asumsi 25°C).

- **Heating Value**

Nilai kalor (*heating value*) dihitung berdasarkan rumus molekul yang terukur dari hasil pengujian GC-MS. Perhitungan heating value menggunakan persamaan empiris Dulong yang ditampilkan pada persamaan (1) dan (2) berikut ini.

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 0,338C + 1,428\left(H - \frac{O}{8}\right) + 0,095S \quad (1)$$

$$\text{LHV (MJ/kg)} = \text{HHV} - 2,44 \times 9 \times \frac{H}{100} \quad (2)$$

Dimana nilai C, H, O, S adalah fraksi massa karbon, *hydrogen*, oksigen dan sulfur dalam *bio oil* yang terbentuk (%massa).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

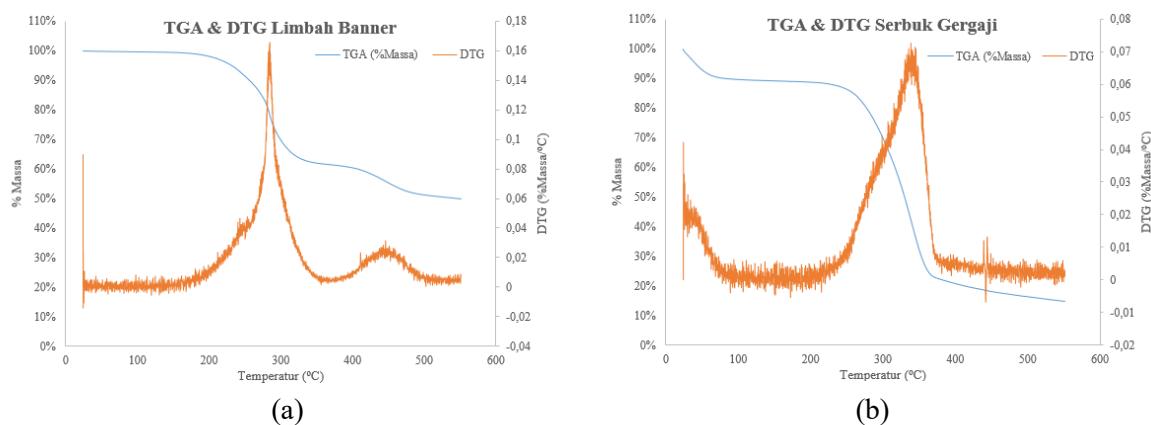
3.1 Karakteristik Bahan Baku

Untuk mengtahui proses dekomposisi dari bahan baku maka dilakukan pengujian *Thermal Gravimetric Analysis*. Untuk hasil analisa berupa kurva termogravimetri (TGA) dan *derivative* (DTG). Kurva hasil analisa untuk bahan limbah banner dan serbuk gergaji disajikan pada Gambar 2. Hasil analisan menunjukkan pola degradasi termal yang berbeda dari kedua bahan, yang mencerminkan perbedaan komposisi kimia dan struktur materialnya. Profil penurunan massa yang terlihat menunjukkan bahwa masing-masing bahan mengalami beberapa tahapan dekomposisi. Mulai dari penguapan air, pelepasan *volatile*, hingga pembentukan residu padat (*bio char*).

Pada hasil uji TGA limbah banner didapatkan penurunan massa terbesar terjadi pada rentang suhu 250–350 °C dengan puncak DTG berada pada suhu 285 °C. Titik ini menunjukkan tahap utama *devolatilisasi*, dimana rantai polimer PVC mulai terurai dan menghasilkan senyawa volatil serta pelepasan gas hidrogen klorida (HCl). Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa proses dekomposisi utama pada PVC dan plastik fleksibel biasanya terjadi pada kisaran 270–320 °C (Tian et al., 2024). Puncak DTG yang tajam pada limbah banner menunjukkan adanya satu fase degradasi dominan. Hal ini menandakan bahwa komposisi polimernya relatif seragam. Puncak DTG yang tajam pada limbah banner menunjukkan adanya satu fase degradasi dominan, menandakan bahwa komposisi polimernya relatif seragam.

Hasil berbeda terjadi pada analisa serbuk gergaji, dimana hasil TGA menunjukkan pola dekomposisi yang lebih lebar dengan puncak DTG pada suhu sekitar 338 °C. Pada temperatur tersebut menjadi titik ideal terhadap tahap utama penguraian hemiselulosa dan selulosa. Sedangkan komponen lignin mengalami proses degradasi secara bertahap pada suhu yang lebih tinggi. Hal ini konsisten dengan

penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa biomassa berbasis kayu mengalami laju degradasi maksimum pada kisaran 320–360 °C (Navarro et al., 2018; Almusafir & Smith, 2024). Kurva penurunan massa yang lebih landai menunjukkan bahwa reaksi dekomposisi serbuk gergaji berlangsung melalui mekanisme yang lebih kompleks.



Gambar 2. TGA & DTG: (a) Limbah Banner (b) Limbah Serbuk Gergaji

Perbandingan kedua profil TGA menegaskan perbedaan perilaku termal antara bahan sintetis dan biomassa. Limbah banner terdegradasi pada suhu yang lebih rendah akibat sifat termoplastiknya, sedangkan pada serbuk gergaji menunjukkan ketahanan termal yang lebih tinggi. Dalam proses pirolisis, adanya perbedaan ini menjadi sesuatu yang penting karena menentukan rentang suhu optimum. Dari hasil didapatkan suhu operasi yang disarankan berada pada kisaran 300–350 °C. Hal ini bertujuan agar kedua bahan dapat terurai secara bersamaan dan menghasilkan efek sinergis. Beberapa penelitian melaporkan bahwa co-pirolisis antara plastik dan biomassa pada rentang suhu tersebut dapat meningkatkan *yield bio-oil* serta menurunkan kadar senyawa beroksigen yang tidak diinginkan (Chao et al., 2023).

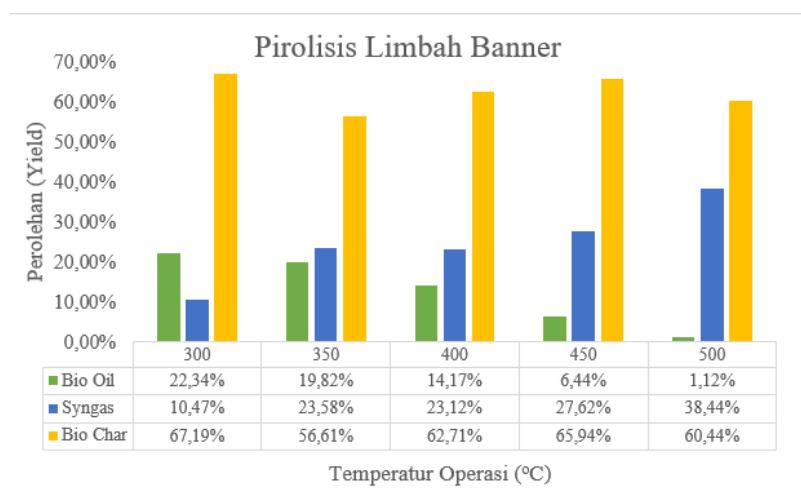
3.2 Perolehan Produk Pirolisis

Pada proses penelitian ini, suhu operasi pirolisis divariasikan pada rentang 300–500 °C dengan interval 50 °C. Hal ini bertujuan untuk mengetahui temperatur operasi terhadap fraksi produk yang dihasilkan. Hasil yang didapatkan berdasarkan data yang ditampilkan pada Gambar 3. Terlihat bahwa perolehan *bio-oil* menurun tajam seiring dengan kenaikan suhu. Perolehan *bio-oil* pada temperatur operasi 300°C sebesar 22,34%, namun menurun pada seiring naiknya temperatur hingga pada 500°C hanya 1,12%.

Hal tersebut berbanding terbalik dengan produktifitas dari pembentukan *syngas* yang menunjukkan profil yang berlawanan. Dimana dengan seiring meningkatnya temperatur operasi, *syngas* yang terbentuk cenderung lebih meningkat. Hal ini ditunjukkan dengan kenaikan *yield* peroleh *syngas* dari 10,47% pada temperatur operasi 300 °C menjadi 38,44% pada 500°C. Perubahan ini disebabkan oleh peningkatan reaksi sekunder pada suhu tinggi. Dimana *volatile* yang terbentuk merupakan hasil dari dekomposisi awal yang mengalami proses *cracking* dan *repolimerisasi* sehingga menjadi gas yang bersifat *non-condensable*. Hal tersebut mirip dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Mufrodi et al. (2025). Dimana penelitian yang dilakukan menghasilkan peristiwa penurunan *yield bio-oil* seiring dengan peningkatan suhu selama proses pirolisis plastik. Peristiwa tersebut diakibatkan dari dominasi reaksi sekunder pada rentang suhu di atas 400 °C (Mufrodi et al., 2025).

Karakteristik dari material PVC sebagai bahan baku dasar pembuatan banner mulai terdekomposisi awal pada rentang temperatur sekitar 250–320°C. Pada peristiwa dekomposisi awal berlangsung, gas hidrogen klorida mengalami pelepasan (*dehydrochlorination*) yang kemudian diikuti dengan pemutusan rantai utama polimer. Pada saat suhu yang lebih tinggi, fragmen hasil dekomposisi

mengalami reaksi karbonisasi dan aromatisasi. Reaksi tersebut yang menyebabkan peningkatan pembentukan gas (*syngas*) serta padatan (*bio-char*) namun berdampak terhadap fraksi cair (*bio-oil*) yang mengalami penurunan. Hasil ini seperti yang dialami penelitian yang dilakukan oleh Su et al. (2024). Dimana pada tahap dehidroklorinasi PVC sebagai pemicu utama pergeseran produk dari fase cair menuju gas dengan seiring peningkatannya temperatur operasi (Su et al., 2025). Lalu diperkuat dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Riesco-avila et al. (2023). Dengan hasil penelitian yang menunjukkan proporsi produk pirolisis lebih berpengaruh terhadap kenaikan temperatur operasi dibandingkan dengan laju pemanasan. Dimana pada temperatur operasi yang tinggi mengakibatkan sebagian besar senyawa volatile mengalami *cracking* hingga menjadi fasa gas. Peristiwa tersebut menjadi faktor dalam kondensasi *bio-oil* hasil pirolisis (Riesco-avila et al., 2022). Dari beberapa referensi dan data penelitian yang didapatkan, temperatur pirolisis limbah banner berada pada rentang 300°C hingga 350°C. Dikarenakan pada rentang temperatur operasi tersebut reaksi *devolatilisasi* berlangsung optimal namun belum didominasi oleh reaksi sekunder.



Gambar 3. Grafik Perolehan Produk Pirolisis Limbah Banner

3.3 Karakteristik *Bio Oil* Hasil Pirolisis

Salah satu metode untuk menentukan karakteristik dari *bio oil* hasil pirolisis adalah menggunakan metode GC-MS. Analisis GC-MS dilakukan untuk mengidentifikasi senyawa kimia penyusun dari *bio-oil*. *Bio-oil* yang dianalisa adalah hasil pirolisis limbah banner untuk variasi temperatur operasi dari 300°C hingga 500°C. Hasil dari analisa GC-MS akan menunjukkan komposisi senyawa kimia yang terbentuk pada *bio-oil* terhadap pengaruh temperatur operasi. Selain itu analisa ini juga untuk mengetahui pengaruh temperatur operasi terhadap perubahan jumlah dan jenis senyawa volatil yang terbentuk. Secara umum, *bio-oil* tersusun atas kelompok ester jenuh berantai panjang, asam karboksilat aromatik, senyawa fenolik dan furanik, hingga senyawa aromatik kompleks dan anhidrida oksigenat. Pergeseran dominasi senyawa yang terbentuk dari *bio-oil* akan mencerminkan pengaruh dari proses devolatilisasi awal, dehidroklorinasi PVC, hingga reaksi sekunder aromatisasi yang terjadi pada suhu tinggi.

Pada proses pirolisis limbah banner pada temperatur operasi 300 °C masih berada pada tahap awal reaksi termal. Berdasarkan hasil analisa *bio-oil* yang terbentuk menggunakan GC-MS yang ditunjukkan pada Tabel 1, senyawa dominan terbentuk berupa *hexadecanoic acid monomethyl ester* dan *benzoic acid methyl ester*. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi utama yang berlangsung adalah esterifikasi dan transesterifikasi dari aditif plastisizer dan residu polimer PVC. Senyawa-senyawa yang terbentuk mengindikasikan bahwa sebagian besar rantai polimer belum terdegradasi sempurna, sehingga menghasilkan *bio-oil* yang kaya oksigen dan cenderung memiliki viskositas tinggi. Pernyataan tersebut didukung dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Chao et al. (2023). Dimana pada hasil penelitian yang dilakukan rentang suhu rendah (250–350 °C), pirolisis plastik

menghasilkan senyawa volatil beroksigen seperti *fatty acid methyl esters* (FAME) dan *benzoate derivatives* sebagai produk utama (Chao et al., 2023).

Tabel 1. Hasil Pengujian GC-MS Bio Oil dari Bahan Limbah Banner pada Temperatur Operasi 300°C

Nama Senyawa	Rumus Molekul	Komposisi (%)	Jenis Senyawa
Butanoic Acid, Propyl Ester (CAS)	C ₇ H ₁₄ O ₂	7,03	Ester
3-Hexanone, 2-Methyl- (CAS)	C ₇ H ₁₄ O	4,22	Keton alifatik
Benzoic Acid, Methyl Ester (CAS)	C ₈ H ₈ O ₂	1,45	Ester aromatic
Cyclopentasiloxane, Decamethyl- (CAS)	C ₁₀ H ₃₀ O ₅ Si ₅	0,52	Siloksan
2,5-Furandicarboxylic Acid, Bis(Trimethylsilyl) Ester (CAS)	C ₁₂ H ₂₀ O ₅ Si ₂	1,18	Ester heterosiklik
Propanoic Acid, 2-Methyl-, Anhydride (CAS)	C ₈ H ₁₄ O ₃	1,95	Anhidrida asam
Octanoic Acid	C ₈ H ₁₆ O ₂	1,02	Asam lemak jenuh
Hexanedioic Acid, Dimethyl Ester (CAS)	C ₈ H ₁₄ O ₄	25,5	Ester diester
2-Butanol, 3-(1-Methylbutoxy)-1,3-Isobenzofurandione	C ₉ H ₂₀ O ₂	1,76	Alkohol eter
Hexanedioic Acid, Monomethyl Ester	C ₈ H ₄ O ₃	7,51	Anhidrida ftalat
1,2-Benzenedicarboxylic Acid, Dimethyl Ester	C ₇ H ₁₂ O ₄	23,05	Monoester adipat
Dodecanoic Acid, Methyl Ester (CAS)	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	3,42	Metil ester
Hexanedioic Acid, Bis(2-Methoxyethyl) Ester	C ₁₂ H ₂₂ O ₆	1,14	Diester polieter
1H-Isoindole-1,3(2H)-Dione (CAS)	C ₈ H ₅ NO ₂	2,25	Imida aromatik
Trans- 4,4-Dideutero Cyclopentene-3,5-Diol	C ₆ H ₈ O ₃	2,86	Diol siklik
4-Acetylphenyl 4-Nitrophenoxyacetate PMP (Pesticide)	C ₁₆ H ₁₃ NO ₆	7,79	Ester aromatik
4-(Methoxycarbonyl) Phenyl (Methyl)Peroxyanhydride	C ₁₁ H ₁₂ NO ₄ PS ₂	0,08	Senyawa aromatik halogenasi
Hexanedioic Acid, Bis(2-Chloroethyl) Ester (CAS)	C ₁₀ H ₁₆ Cl ₂ O ₄	0,67	Diester halogenasi
Hexadecanoic Acid, Methyl Ester (CAS)	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	0,63	Metil ester
Ethylene Glycol Di-N-Butyrate	C ₁₀ H ₁₈ O ₄	1,16	Diester etilen glikol
Cyclohexane, 1-(Cyclohexylmethyl)-2-Ethyl-, Trans- (CAS)	C ₁₅ H ₂₈	0,24	Hidrokarbon siklik
Dimethyl 4-Methyloctane-1,8-Dioate	C ₁₁ H ₂₀ O ₄	0,2	Diester alifatik
Butyric Acid, 1-Propylpentyl Ester	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	1,06	Ester
N-(1-Cyanovinyl)Benzamide	C ₁₀ H ₈ N ₂ O	0,11	Amida aromatik
Trans-2,3-Diacetoxy Tetra Hydropyran	C ₉ H ₁₄ O ₅	0,12	Ester siklik teroksigenasi
2-(2-Chloro-2,3,3-Trifluoro-Cyclobutyl)-Cyclopropanecarboxylic Acid Methyl Ester	C ₉ H ₁₀ ClF ₃ O ₂	0,1	Ester halogenasi

Namun pada saat temperatur operasi dinaikkan ke 350 °C, proses dekomposisi menjadi lebih aktif dan kompleks. Hal tersebut berdasarkan dari hasil pengujian bio oil menggunakan GC-MS yang ditunjukkan pada Tabel 2. Data yang disajikan pada Tabel 2 memperlihatkan munculnya senyawa seperti *2,5-furandicarboxylic acid bis(trimethylsilyl) ester* serta *2,3-octanedione*. Senyawa-senyawa yang terbentuk menunjukkan terjadinya reaksi dekarboksilasi dan oksidasi parsial pada rantai karbon

panjang. Selain itu pada temperatur operasi 350°C mulai terdeteksi senyawa organosulfur dan aromatik terklorinasi, seperti *thiadiazolyl-thiourea*. Senyawa tersebut yang merupakan hasil dari proses dehidroklorinasi (DHC) pada PVC. Fenomena pelepasan HCl dengan jumlah yang besar pada rentang temperatur operasi 300°C hingga 370 °C didukung oleh pernyataan Tian et al. (2024). Dimana pada tahapan DHC merupakan fase kunci yang menentukan evolusi senyawa volatil berklorin selama pirolisis PVC (Tian et al., 2024)

Tabel 2. Hasil Pengujian GC-MS Bio Oil dari Bahan Limbah Banner pada Temperatur Operasi 350°C

Nama Senyawa	Rumus Molekul	Komposisi (%)	Jenis Senyawa
<i>1-[3-(4-Chlorophenyl)-acryloyl]-3-(5-ethyl-[1,3,4]thiadiazol-2-yl)-thiourea</i>	C ₁₄ H ₁₃ C ₁ N ₄ OS ₂	16,95	Turunan organosulfur-aromatik
<i>Methyl 2-Amino-4,5,6,7-tetrahydrobenzo[b]thiophene-3-carboxylate</i>	C ₁₀ H ₁₃ NO ₂ S	0,15	Ester aromatik
<i>β-D4-Tetrahydropyran</i>	C ₅ H ₁₀ O	0,13	Siklik eter
<i>2,5-Furandicarboxylic acid, bis(trimethylsilyl) ester</i>	C ₁₂ H ₂₂ O ₅ Si ₂	24,86	Ester turunan furan
<i>Butanoic acid, 2-propenyl ester</i>	C ₇ H ₁₂ O ₂	0,03	Ester
<i>Hexanedioic acid, dimethyl ester (Dimethyl adipate)</i>	C ₈ H ₁₄ O ₄	0,19	Diester alifatik
<i>N-Methyl-3-furyl-5-(trimethylsilyl)isoxazolidine</i>	C ₉ H ₁₇ NO ₂ Si	6,81	Heterosiklik
<i>2,3-Octanedione</i>	C ₈ H ₁₄ O ₂	32,23	Diketon alifatik
<i>1,2-Benzenedicarboxylic acid (Phthalic acid)</i>	C ₈ H ₆ O ₄	2,56	Asam aromatik
<i>Hexanedioic acid, monomethyl ester (Monomethyl adipate)</i>	C ₇ H ₁₂ O ₄	1,21	Monoester alifatik
<i>Nonanoic acid, 9-chloro-9-oxo-, methyl ester</i>	C ₁₀ H ₁₇ ClO ₃	3,02	Ester berhalogenasi
<i>2,7-Oxepanedione</i>	C ₆ H ₈ O ₄	0,14	Heterosiklik
<i>4-Acetylphenyl 4-nitrophenoxyacetate</i>	C ₁₆ H ₁₃ NO ₆	0,08	Aromatik kompleks
<i>Hexanedioic acid, bis(2-chloroethyl) ester</i>	C ₁₀ H ₁₆ Cl ₂ O ₄	0,06	Diester halogenasi
<i>Hexadecanoic acid, methyl ester (Methyl palmitate)</i>	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	0,21	FAME
<i>1-(Phenyldimethylsilyl)-2-propanone</i>	C ₁₁ H ₁₆ OSi	0,60	Organosiloksan
<i>Benzenepropanoic acid, β-bromo-3-nitro-</i>	C ₉ H ₈ BrNO ₄	1,10	Asam aromatik halogenasi
<i>2-Hexen-4-ol, 5-methyl-4-(2-Chlorophenyl)-5-(4-pyridinyl)-4H-1,2,4-triazol-3-yl hydrosulfide</i>	C ₇ H ₁₄ O C ₁₃ H ₉ ClN ₄ S	1,51 16,95	Alkohol Heterosiklik-S-N kompleks

Berdasarkan hasil analisa GC-MS untuk *bio-oil* hasil pirolisis pada temperatur 400 °C yang ditunjukkan Tabel 3 menghasilkan senyawa yang berubah secara signifikan. Berdasarkan Tabel 3 senyawa fenolik dan furanik muncul lebih dominan. Senyawa *2,5-benzofurandiol*, *2,3-dihydro-3,3-dimethyl-5-methanesulfonate* dengan komposisi 22,83% dan *furfuryl alcohol* serta *hexadecanoic acid dimethyl ester* 44,13% menjadi produk utama/dominan. Kehadiran fenol dan turunannya menunjukkan terjadinya *cracking* rantai aromatik PVC dan reaksi sekunder oksigenat dengan

melibatkan fragmen karbon dari hasil dehidroklorinasi sebelumnya. Selain itu, terbentuknya senyawa furanik seperti furfural menandakan adanya jalur reaksi siklis. Dimana reaksi siklis umumnya ditemukan pada pirolisis bahan organik yang mengandung gugus oksigen. (Sun et al., 2023).

Tabel 3. Hasil Pengujian GC-MS Bio Oil dari Bahan Limbah Banner pada Temperatur Operasi 400°C

Nama Senyawa	Rumus Molekul	Komposisi (%)	Jenis Senyawa
2,5-Benzofurandiol, 2,3-dihydro-3,3-dimethyl-, 5-methanesulfonate (±)	C ₁₁ H ₁₄ O ₅ S	22,83	Fenolik
2-Furanmethanol, tetrahydro-	C ₅ H ₁₀ O ₂	6,49	Alkohol siklik / furan
Butanoic acid, propyl ester	C ₇ H ₁₄ O ₂	11,46	Ester alifatik
Hexanedioic acid, dimethyl ester (adipic acid dimethyl ester)	C ₈ H ₁₄ O ₄	44,13	Ester dikarboksilat
[1,1'-Biphenyl]-3,4-diol, 4'-chloro-	C ₁₂ H ₉ ClO ₂	2,51	Aromatik / fenolik
N-Methyl-3-furyl-5-(trimethylsilyl)isoxazolidine	C ₉ H ₁₇ NO ₂ Si	0,96	Heterosiklik nitrogen-silikon
1,2-Benzenedicarboxylic acid, monomethyl ester (mono-methyl phthalate)	C ₉ H ₈ O ₄	2,50	Ester
Hexanedioic acid, monomethyl ester	C ₇ H ₁₂ O ₄	9,12	Ester

Pada temperatur operasi pada 450 °C terjadi perubahan arah reaksi yang menjadikan dominasi pembentukan oksigenat berat dan senyawa halogenasi kompleks. Terlihat dari Tabel 4 senyawa utama yang terdeteksi adalah hexadecanoic acid bis(2-chloroethyl) ester dan phosphonic acid (acetyl amino)methyl ester. Senyawa-senyawa tersebut yang merupakan hasil rekombinasi radikal antara fragmen karbon dengan unsur halogen. Pada kondisi ini, fraksi *bio-oil* masih didominasi oleh *dimethyl palmitate* sebesar 57,99%. Dimana senyawa tersebut relatif stabil terhadap proses *cracking* lanjut. Peristiwa proses aromatisasi parsial dan reaksi radikal pada suhu ini telah banyak dilaporkan. Seperti studi yang dilakukan Asueta et al (2023) yang menjelaskan bahwa peningkatan suhu di atas 440 °C memicu pembentukan oksigenat berat dan senyawa aromatik kompleks. Hal tersebut mengakibatkan reaksi sekunder yang intens (Asueta et al., 2023)

Tabel 4. Hasil Pengujian GC-MS Bio Oil dari Bahan Limbah Banner pada Temperatur Operasi 450°C

Nama Senyawa	Rumus Molekul	Komposisi (%)	Jenis Senyawa
4-Cyclohexene-1,2-dicarboximide, N-ethyl-, cis-	C ₁₀ H ₁₃ NO ₂	7,53	Imida aromatik
β-D4-Tetrahydropyran	C ₅ H ₁₀ O	6,09	Eter siklik
Diethylboric acid, (2-methoxyethyl) ester	C ₇ H ₁₇ BO ₃	12,45	Ester alifatik
Hexanedioic acid, dimethyl ester	C ₈ H ₁₄ O ₄	57,89	Ester asam dicarboksilat
[1,1'-Biphenyl]-3,4-diol, 4'-chloro-	C ₁₂ H ₉ ClO ₂	0,46	Aromatik fenolik
p-Hydroxyphenylhydrcrylate 3TMS	C ₁₃ H ₂₂ O ₄ Si ₃	0,27	Fenolik tersilanisasi
Talsutin	C ₁₆ H ₁₄ N ₂ O ₆ S	3,41	Heterosiklik aromatik
Hexanedioic acid, monomethyl ester	C ₇ H ₁₂ O ₄	4,49	Ester asam lemak
Nonanoic acid, 9-chloro-9-oxo-, methyl ester	C ₁₀ H ₁₇ ClO ₃	2,26	Ester halogenasi

Nama Senyawa	Rumus Molekul	Komposisi (%)	Jenis Senyawa
1,2-Benzenedicarboxylic acid, dimethyl ester	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	0,58	Ester aromatik
Methyl 6-oxononanoate	C ₁₀ H ₁₈ O ₃	2,67	Ester alifatik oksigenasi
Hexanedioic acid, bis(2-chloroethyl) ester	C ₁₀ H ₁₆ Cl ₂ O ₄	1,43	Ester halogenasi
Phosphonic acid, [(acetylamino)methyl]-, bis(trimethylsilyl) ester	C ₈ H ₂₀ NO ₅ PSi ₂	0,80	Ester fosfonat

Untuk hasil pada varasi temperatur tertinggi yaitu pada 500 °C proses pirolisis didominasi menuju senyawa anhidrida aromatik dan siklik oksigenat. Terlihat pada data yang ditampilkan pada Tabel 5 dimana terjadi pergeseran, seperti terbentuknya *1,3-isobenzofurandione* (13,65%) dan *hexadecanoic acid dimethyl ester* (57,34%). Terbentuknya senyawa anhidrida ini menandakan terjadinya *cracking* lebih lanjut dan reaksi penutupan cincin (*ring-closure*) yang diikuti dengan proses aromatisasi termal. Fenomena ini menunjukkan bahwa sebagian besar rantai panjang telah terfragmentasi menjadi struktur aromatik stabil, namun berakibat pembentukan fraksi cair berkurang akibat peningkatan konversi menjadi gas *non-condensable*. Hasil ini serupa dengan statement Olomo et al (2024) yang melaporkan bahwa suhu di atas 450 °C akan mempercepat pembentukan senyawa aromatik kompleks melalui deoksigenasi dan kondensasi cincin karbon (Olomo et al., 2024).

Tabel 5. Hasil Pengujian GC-MS Bio Oil dari Bahan Limbah Banner pada Temperatur Operasi 500°C

Nama Senyawa	Rumus Molekul	Komposisi (%)	Jenis Senyawa
4-Nonanol	C ₉ H ₂₀ O	3,95	Alkohol
4-Cyclohexene-1,2-dicarboximide, <i>N</i> -ethyl-, <i>cis</i> -	C ₁₀ H ₁₃ NO ₂	16,82	Senyawa siklik
Hexanedioic acid, dimethyl ester	C ₈ H ₁₄ O ₄	57,34	Ester
1,3-Isobenzofurandione	C ₈ H ₄ O ₃	13,65	Anhidrida asam
Hexanedioic acid, monomethyl ester	C ₇ H ₁₂ O ₄	2,49	Ester
Hexanedioic acid, bis(2-methoxyethyl) ester	C ₁₂ H ₂₂ O ₆	0,07	Ester
Nonanoic acid, 9-chloro-9-oxo-, methyl ester	C ₁₀ H ₁₇ ClO ₃	4,02	Asam lemak ester
Hexanedioic acid, ethyl methyl ester	C ₉ H ₁₆ O ₄	0,48	Ester
1,2-Benzenedicarboxylic acid, dimethyl ester	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	0,26	Ester aromatik
Methyl 6-oxononanoate	C ₁₀ H ₁₈ O ₃	0,90	Ester alifatik

Hasil peninjauan dengan mengkomparatif data hasil pengujian GC-MS antar temperatur operasi, didapatkan pada suhu rendah (300–350 °C) cenderung menghasilkan *bio-oil* yang kaya akan senyawa beroksigen seperti ester dan asam karboksilat. Namun senyawa-senyawa tersebut bersifat kestabilan termal rendah. Untuk hasil pada temperatur operasi pada temperatur menengah (400 °C), *bio oil* yang terbentuk menunjukkan komposisi paling seimbang antara ester jenuh dan senyawa fenolik–furanik. Sehingga menghasilkan energi lebih tinggi serta karakteristik kimia yang lebih mudah ditingkatkan. Sementara itu, *bio-oil* yang terbentuk pada suhu tinggi (≥450 °C) lebih dominan menghasilkan senyawa oksigenat berat dan aromatik kompleks. Meskipun senyawa tersebut lebih stabil, namun mengurangi fraksi kondensabel akibat dominasi reaksi sekunder.

Sehingga temperatur operasi pada suhu 400 °C dianggap sebagai kondisi optimum untuk menghasilkan *bio-oil* berkualitas. Hal ini desebabkan produksi *bio-oil* dengan kandungan fenolik dan ester yang seimbang. Kondisi tersebut mewakili titik transisi antara dekomposisi polimer primer dan *onset* reaksi sekunder aromatisasi. Untuk temperatur operasi lebih dari temperatur tersebut terjadi peningkatan aromatisasi yang menyebabkan penurunan *yield* fasa cair. Sehingga meningkatkan pembentukan fase gas dan padatan karbon. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pengendalian temperatur operasi menjadi kunci dalam mengarahkan distribusi produk. Dimana temperatur operasi menjadi kunci untuk tujuan akhir proses, baik untuk produksi minyak cair (*bio-oil*) maupun gas sintetis (*syngas*).

Tabel 6. Hasil Pengujian GC-MS Bio Oil dari Campuran Limbah Banner 75% dan Serbuk Gergaji 25% pada Temperatur Operasi 400°C

Nama Senyawa	Rumus Molekul	Komposisi (%)	Jenis Senyawa
2,5-Benzofurandiol, 2,3-dihydro-3,3-dimethyl-, 5-methanesulfonate, (±)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₅ S	75,61	Senyawa aromatik oksigenat
3-Hexanone, 2-methyl-	C ₇ H ₁₄ O	7,25	Ketona alifatik
Hexanedioic acid, dimethyl ester	C ₈ H ₁₄ O ₄	6,32	Ester asam dikarboksilat
Cyclohexanol, 2-[(2-hydroxyethyl)thio]-	C ₈ H ₁₆ O ₂ S	10,82	Alkohol tiol tersubstitusi (sulfur organik)

Hasil GC-MS pada Tabel 6 merupakan hasil analisa *bio oil* variasi bahan baku limbah banner sebesar 75 % dicampur dengan serbuk gergaji 25 % dengan proses pirolisis pada suhu 400 °C. Hasil analisa GC-MS untuk *bio-oil* yang terbentuk menunjukkan dominasi senyawa aromatik oksigenat. Seperti terlihat Tabel 6 dimana senyawa 2,5-benzofurandiol menjadi dominasi dengan komposisi sekitar 75,61 %. Peristiwa ini mengindikasikan bahwa kehadiran biomassa kayu (serbuk gergaji) berperan dalam pembentukan senyawa fenolik/furanik melalui transfer radikal atau hidrogen dari fragmen kayu terhadap plastik. Peristiwa tersebut berakibat meningkatnya komposisi struktur siklik aromatik dalam *bio-oil*. Peristiwa ini sesuai dengan artikel co-pirolisis plastik dan biomassa, di mana campuran bahan baku plastik dengan biomassa menghasilkan fraksi *bio-oil* dengan kandungan senyawa aromatik dan hidrokarbon yang jauh lebih tinggi dibandingkan pirolisis berbahan tunggal (Chao et al., 2023).

Akibat dari adanya campuran serbuk gergaji (biomassa) memberikan pengaruh terhadap proporsi dalam fraksi *bio-oil*. Dengan bahan baku campuran yang sebagian besar banner (plastik) tetap menghasilkan senyawa ester dan alifatik (contoh: 3-Hexanone, 2-methyl- dan Hexanedioic acid, dimethyl ester) walaupun dalam persentase lebih rendah dibanding senyawa aromatik. Hal ini mengindikasikan bahwa campuran limbah serbuk gergaji membantu mempercepat jalur reaksi sekunder yang memecah rantai panjang plastik. Selain itu juga mengarahkan fragmentasi ke arah pembentukan struktur aromatik lebih stabil. Hal ini diperkuat dengan literatur yang menuliskan bahwa biomassa kayu dalam pirolisis plastik dapat berperan sebagai penyumbang atom hidrogen atau radikal promoter. Sehingga mengurangi senyawa oksigenat ringan dan meningkatkan senyawa aromatik dalam minyak pirolisis (Fujin et al., 2023).

Sehingga untuk variasi pirolisis campuran limbah banner 75% terhadap serbuk gergaji 25% pada temperatur 400°C mendapatkan hasil penelitian yang cukup baik. Hal ini diperkuat dengan *bio-oil* yang dihasilkan memiliki potensi menghasilkan komposisi yang lebih stabil dan bernilai tambah. Hal tersebut berdasarkan *bio oil* yang dihasilkan kaya akan aromatik oksigenat dibandingkan bahan baku banner murni temperatur operasi yang sama. Oleh karena itu, kondisi ini menjadi variasi dengan kondisi ideal apabila target berupa *bio-oil* yang memiliki sifat kimia yang lebih banyak aromatik dibandingkan hanya fraksi ester atau asam karboksilat sederhana (Chao et al., 2023). Namun perlu menjadi perhatian, meskipun senyawa aromatik meningkat pada kondisi ini namun pengaruh suhu dan campuran terhadap *yield* secara keseluruhan tetap harus diperhitungkan. Dikarenakan peningkatan aromatisasi berhubungan terhadap peningkatan *yield* pada fasa gas (*syngas*) maupun padatan (*bio-char*). Sehingga fraksi cair (*bio-oil*) mengalami penurunan. Peristiwa tersebut diperkuat dari literatur yang menyatakan bahwa kontrol arus radikal, rasio bahan, dan waktu tinggal menjadi faktor kunci dalam mengoptimalkan kualitas dan kuantitas *bio-oil* yang dihasilkan (Fujin et al., 2023).

3.4 Sifat Fisik *Bio-Oil*

Sifat fisik *bio-oil* seperti densitas, viskositas, dan nilai kalor merupakan parameter penting untuk menentukan kualitas serta potensi pemanfaatannya sebagai bahan bakar alternatif (Wanignon et al., 2023). Parameter tersebut menggambarkan proses pirolisis berlangsung secara optimal sehingga menghasilkan *bio oil* dengan struktur kimia berenergi tinggi dengan kestabilan termal (Stelmach et al., 2023). Peranan nilai densitas dan viskositas pada *bio-oil* menjadi parameter karakter fluida dan karakteristik molekul yang terbentuk dalam *bio-oil*. Sedangkan nilai kalor (*heating value*) menjadi indikator untuk kandungan energi yang tersimpan di dalam *bio-oil* (Jos et al., 2021).

Pada penelitian ini, nilai kalor didapatkan dengan menggunakan pendekatan persamaan empiris Dulong yang dituliskan pada persamaan (1) dan (2). Pendekatan perhitungan heating value menggunakan persamaan dulong berdasarkan komposisi unsur utama (C, H, O, dan S) yang didapatkan dari hasil analisis GC-MS *bio-oil* (Wanignon et al., 2023). Pendekatan ini memungkinkan estimasi yang cukup akurat untuk mengukur nilai energi yang terdapat pada *bio-oil* tanpa perlu melakukan pembakaran secara langsung. Hasil pengukuran densitas, viskositas dan perhitungan *heating value* ditampilkan pada Tabel 7 berikut ini

Tabel 7 Densitas, Viskositas dan *Heating Value Bio Oil*

Produk <i>Bio Oil</i>	Densitas (kg/m ³)	Viskositas (cP)	<i>Heating Value (MJ/kg)</i>	
			HHV	LHV
Limbah Banner 300°C	1.126,745	1,354	24,981	23,307
Limbah Banner 350°C	1.120,217	1,302	27,308	25,672
Limbah Banner 400°C	1.071,583	1,158	23,509	21,833
Limbah Banner 450°C	1.042,207	1,328	25,667	23,837
Limbah Banner 500°C	1.118,912	1,430	24,976	23,354
Banner 75% : Serbuk Gergaji 25% 400°C	1.141,434	1,523	21,079	19,657

Berdasarkan Tabel 7 densitas *bio-oil* yang dihasilkan dari pirolisis limbah banner memiliki rentang kisaran 1.024–1.127 kg/m³. Semakin dengan meningkatnya temperatur operasi, profil densitas cenderung menurun hingga suhu 450 °C, kemudian meningkat sedikit pada 500 °C. Profil turunnya densitas terhadap kenaikan suhu temperatur menunjukkan proses *thermal cracking* dan *depolymerization* berlangsung. Peningkatan proses *thermal cracking* dan *depolymerization* seiring meningkatnya temperatur operasi mengakibatkan molekul volatil yang didapatkan dengan ukuran rantai lebih kecil, sehingga densitas *bio-oil* menjadi lebih rendah. Dan peristiwa meningkatnya densitas pada temperatur operasi 500°C mengindikasikan terjadinya *secondary polymerization* dan pembentukan senyawa aromatik berat. Akibat proses *secondary polymerization* dan pembentukan senyawa aromatik menjadikan peningkatan massa jenis *bio-oil*. Peristiwa ini hampir sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Sharma et al. (2024). Dimana hasil yang didapat bahwa kenaikan suhu reaksi mempercepat fragmentasi molekul dan mengubah proporsi hidrokarbon aromatik serta oksigenat, yang secara langsung memengaruhi densitas akhir *bio-oil* (Sharma et al., 2024).

Hasil dari pengukuran viskositas *bio-oil* dari proses pirolisis limbah banner didapatkan dengan rentang yang saling mendekati yaitu pada 1,15–1,43 cP. Viskositas dengan nilai terendah diperoleh pada temperatur operasi 400 °C dengan nilai 1,158 cP. Perolehan viskositas *bio-oil* yang rendah pada temperatur operasi 400°C mengindikasikan bahwa kondisi tersebut menjadi titik optimum proses pirolisis. Profil seperti tersebut diasumsikan bahwa *volatile* yang terbentuk dari proses pirolisis yang sebelumnya berrantai panjang terjadi degradasi menjadi molekul menengah tanpa dominasi reaksi kondensasi lanjutan. Namun anomali yang terjadi pada *bio-oil* hasil pirolisis pada temperatur 500°C terjadi peningkatan dengan nilai 1,43 cP. Hal ini diperkirakan karena pembentukan senyawa aromatik berat dan residu karbon (*char precursor*). Peristiwa tersebut mengakibatkan peningkatan kekentalan cairan. Peristiwa ini hampir sama seperti penelitian yang dilakukan oleh Lachos-Pérez et al. (2023). Dimana pada hasil penelitian menyatakan bahwa *secondary cracking* dan *polymer recombination* yang terjadi pada suhu tinggi megakibatkan peningkatan fraksi aromatik sehingga

meningkatkan viskositas *bio-oil* yang diakibat bertambahnya berat molekul rata-rata (Lachos-perez et al., 2023).

Hasil perhitungan nilai kalor (*Heating Value*) *bio oil* hasil pirolisis limbah banner memperlihatkan profil yang fluktuatif dengan rentang antara 23 hingga 27 MJ/kg. *Bio oil* dengan nilai *heating value* tertinggi adalah hasil pirolisis pada temperatur operasi 350°C dengan nilai 27.308 MJ/kg. Hal ini menjadi indikasi bahwa pada temperatur operasi 350°C adalah kondisi optimum untuk pembentukan hidrokarbon jenuh dan aromatik ringan namun menghasilkan senyawa dengan kandungan oksigen relatif lebih rendah (Syamsiro et al., 2020). Penurunan nilai kalor pada temperatur operasi diatas 400°C diindikasi adanya peningkatan reaksi deoksigenasi serta pembentukan senyawa aromatik berat dengan ikatan stabil yang sulit teroksidasi. Menurut Maulinda (2023), peningkatan suhu pirolisis pada plastik dan biomassa memang cenderung menurunkan nilai kalor setelah titik optimum karena fragmentasi lanjut menghasilkan senyawa beraroma tinggi namun nilai dari energi pembakaran lebih rendah akibat peningkatan fraksi non-kondensabel (Maulinda et al., 2023).

Untuk hasil *bio oil* dari pirolisis campuran banner 75 % : serbuk gergaji 25 % pada temperatur operasi 400 °C menunjukkan karakter yang berbeda. Densitas meningkat menjadi 1.141 kg/m³, dan viskositas juga naik menjadi 1,523 cP dibandingkan dengan pirolisis banner murni dengan temperatur operasi yang sama. Hal ini mengindikasikan adanya interaksi antara senyawa lignoselulosa dari serbuk kayu dan polimer PVC dari banner. Senyawa lignin-derivatif dari serbuk gergaji menghasilkan *bio-oil* dengan komponen polar seperti fenolik dan furanik yang cenderung meningkatkan densitas dan viskositas. Namun dengan peningkatan densitas dan viskositas mengakibatkan penurunan nilai kalor (21.079 MJ/kg) yang disebabkan tingginya kandungan oksigen. Fenomena serupa dilaporkan oleh Chao et al. (2023) dalam studi *co-pyrolysis plastic-biomass*, di mana senyawa oksigenat dari biomassa menyebabkan penurunan nilai kalor meskipun stabilitas minyak meningkat melalui pembentukan senyawa aromatik-oksigenat (Chao et al., 2023).

3.5 Potensi Aplikasi *Bio-Oil*

Berdasarkan hasil percobaan, *bio-oil* yang dihasilkan memiliki karakteristik kimia dan fisik yang menjanjikan untuk dikembangkan sebagai bahan bakar cair maupun bahan baku kimia sehingga limbah banner memiliki nilai tambah. Komposisi senyawa hasil analisa GC-MS menghasilkan *bio-oil* dari proses pirolisis limbah banner mengandung berbagai kelompok senyawa, termasuk ester alifatik, asam karboksilat, fenolik, dan senyawa aromatik oksigenat. Senyawa yang dihasilkan pada *bio-oil* tidak hanya berpotensi sebagai bahan baku dari bahan bakar alternatif, juga sebagai bahan baku dalam industri kimia dan farmasi, seperti pelarut, dan aditif (Hasan et al., 2023). Berdasarkan hasil percobaan, kondisi optimum didapatkan temperatur operasi 400 °C, dimana fraksi cair yang dihasilkan menunjukkan komposisi yang seimbang antara senyawa fenolik dan ester, yang berkontribusi terhadap kestabilan termal dan nilai kalor yang relatif tinggi (Iriondo & Acha, 2024).

Sifat fisik yang dihasilkan pada *bio-oil* hasil pirolisis pada variasi temperatur 300°C hingga 500°C, limbah banner memiliki densitas antara 1,04–1,12 kg/m³ dan viskositas dalam rentang 1,18–1,43 cP. Densitas dan viskositas dengan nilai tersebut menandakan bahwa minyak memiliki kekentalan moderat dan mudah dialirkan. Lalu nilai kalor yang dihitung berdasarkan rumus molekul yang terbentuk didapatkan nilai tertinggi pada suhu 350 °C dengan nilai HHV 27,308 MJ/kg. Dengan nilai tersebut menunjukkan *bio oil* pada temperatur 350°C memiliki kandungan energi yang sebanding dengan beberapa bahan bakar cair hasil pirolisis biomassa lain (Rony et al., 2025). Dengan nilai *heating value* tersebut, *bio-oil* dari limbah banner berpotensi sebagai bahan bakar cair untuk kebutuhan pembakaran skala kecil seperti boiler atau tungku. Selain itu alternatif lain penggunaan *bio-oil* tersebut dapat dijadikan sebagai bahan campuran (*fuel blend*) setelah melalui tahap *upgrading* untuk menurunkan kadar oksigen dan meningkatkan stabilitas kimia.

Untuk hasil *bio oil* dari campuran 75 % limbah banner dan 25 % serbuk gergaji pada temperatur operasi 400°C memberikan hasil berbeda dibandingkan dengan pirolisis dengan limbah banner murni dengan temperatur operasi yang sama. Dari hasil GC-MS menunjukkan peningkatan dominasi

senyawa aromatik oksigenat dan alkohol tiol, yang berasal dari interaksi antara senyawa lignoselulosa kayu dengan polimer banner selama proses pyrolysis (Chao et al., 2023). Hasil *bio oil* dari campuran campuran 75 % limbah banner dan 25 % serbuk gergaji didapatkan densitas 1,14 kg/m³, viskositas 1,52 cP, dan nilai kalor 21,079 MJ/kg. Melihat dari senyawa pada *bio oil* yang dihasilkan, diapatkan senyawa dengan kestabilan yang lebih tinggi dibandingkan *bio oil* hasil pirolisis limbah banner murni. Tetapi *bio oil* yang dihasilkan menghasilkan kandungan energi sedikit lebih rendah dibanding pirolisis banner murni. Fenomena ini menunjukkan bahwa kehadiran biomassa memperkaya struktur aromatik dan memperbaiki kestabilan termal *bio-oil*, meskipun dengan sedikit penurunan energi per satuan massa.

Selain menghasilkan bio oil sebagai fraksi cair, proses pirolisis juga menghasilkan *char* dan gas mampu bakar (*syngas*) sebagai produk samping. *Char* yang terbentuk dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku karbon aktif atau adsorben, sedangkan *syngas* yang kaya akan senyawa seperti H₂, CH₄, dan hidrokarbon ringan berpotensi digunakan sebagai bahan bakar berbentuk gas.

3.6 Tantangan

Bio-oil hasil proses pirolisis limbah banner menghasilkan senyawa dengan campuran hidrokarbon, beroksigen, dan turunan nitrogen yang kompleks. Efek dari terbentuknya senyawa oksigenat seperti asam karboksilat, ester, dan fenolik, , menjadi salah satu faktor yang dapat menurunkan nilai kalor serta kestabilan termal *bio-oil*. Dan keberadaan dari senyawa-senyawa tersebut mengakibatkan kecenderungan peningkatan viskositas dan densitas. Dengan peningkatan densitas dan viskositas secara tidak langsung menurunkan volatilitas minyak, sehingga diperlukan langkah lanjutan untuk memperbaiki kualitasnya. Selain itu, terbentuknya kandungan senyawa nitrogen dan klorida pada *bio oil* hasil pirolisis limbah banner yang berasal dari struktur PVC berpotensi menghasilkan emisi gas asam seperti HCl atau NO_x saat pembakaran. sehingga diperlukan proses deklorinasi dan denitrifikasi untuk mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan.

Berdasarkan pernyataan Hua et al., (2015) mengatakan bahwa proses *upgrading bio-oil* melalui proses *hydrodeoxygenation* atau *catalytic reforming* dapat menurunkan kandungan oksigen dan nitrogen pada *bio-oil*, sehingga menghasilkan fraksi bahan bakar dengan nilai kalor lebih tinggi. Selain itu proses *upgrading bio-oil* juga menambah kestabilan kimia lebih baik dan menghasilkan viskositas yang lebih rendah (Hua et al., 2015). Sehingga diharapkan dengan proses upgrading dapat meminimalkan senyawa terklorinasi sekaligus meningkatkan rasio hidrokarbon aromatik yang lebih stabil secara termal.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah banner memiliki potensi menambah nilai guna dengan cara konversi menggunakan metode pirolisis sehingga menjadi *bio-oil*. Analisis bahan baku menggunakan TGA didapatkan bahwa dekomposisi limbah banner terjadi pada suhu 285°C. Sedangkan temperatur optimum untuk proses dekomposisi untuk limbah serbuk gergaji terjadi pada suhu 338°C. Dengan perbedaan suhu optimum keduanya memungkinkan terjadinya proses pirolisis yang ideal terjadi pada rentang suhu 300–400 °C.

Variasi suhu operasi terbukti memengaruhi distribusi hasil pirolisis. *Yield bio-oil* tertinggi diperoleh pada suhu 300 °C sebesar 22,34%, namun menurun seiring kenaikan suhu akibat dominasi reaksi *secondary cracking*, sementara pembentukan gas meningkat. Komposisi kimia hasil GC-MS menunjukkan bahwa pada suhu rendah hingga menengah, *bio-oil* didominasi oleh senyawa ester dan asam karboksilat, sedangkan pada suhu di atas 400 °C terbentuk senyawa fenolik, furanik, dan aromatik kompleks yang meningkatkan kestabilan termal namun menurunkan fraksi cair.

Kondisi optimum diperoleh pada suhu 400 °C, di mana *bio-oil* menunjukkan keseimbangan antara fraksi fenolik dan ester, menghasilkan minyak dengan stabilitas kimia dan nilai kalor yang baik. Hasil

GC-MS pada suhu tersebut mengindikasikan dominasi senyawa *2,5-benzofurandiol* dan *hexanedioic acid dimethyl ester* yang memiliki kontribusi besar terhadap peningkatan karakteristik bahan bakar.

Campuran 75% limbah banner dan 25% serbuk gergaji menghasilkan efek sinergis pada kualitas *bio-oil*. Kandungan aromatik oksigenat meningkat signifikan (sekitar 75,6%) disertai pembentukan alkohol tiol akibat interaksi lignoselulosa kayu dengan fragmen polimer banner. *Bio-oil* campuran ini memiliki densitas 1,14 kg/m³, viskositas 1,52 cP, dan nilai kalor 21,08 MJ/kg, sehingga menunjukkan kestabilan termal yang lebih tinggi meskipun kandungan energi sedikit menurun.

Pirolisis limbah banner pada semua varasi menghasilkan *bio-oil* dengan densitas pada rentang 1,04–1,12 kg/m³, viskositas 1,18–1,43 cP. Untuk nilai kalor *bio-oil* tertinggi dihasilkan pada variasi temperatur operasi 350°C dengan nilai kalor (HHV) 27,31 MJ/kg. Nilai kalor tersebut setara dengan *bio-oil* yang dihasilkan biomassa lain. Sehingga *bio-oil* tersebut berpotensi digunakan sebagai bahan bakar cair skala kecil atau *fuel blend* namun harus melalui tahap *upgrading* terlebih dahulu.

Pirolisis limbah banner dan campuran dengan serbuk gergaji tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan limbah plastik dan biomassa, tetapi juga membuka menjadi solusi dalam pengembangan energi terbarukan. Tahapan *upgrading* seperti *hydrodeoxygenation* atau *catalytic reforming* disarankan untuk meningkatkan kualitas *bio-oil*. Proses tersebut bertujuan untuk menurunkan kadar oksigen dan klor, serta memperbaiki kestabilan kimia sehingga menghasilkan produk *bio-oil* yang dapat digunakan bahan baku untuk bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan menjadi solusi dari timbulnya pasca pemilu dan industri kayu berupa limbah banner dan serbuk gergaji dengan proses pirolisis. Sehingga permasalahan limbah dapat dijadikan bahan baku untuk sumber energi alternatif yang berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang terlibat dalam proses penyusunan artikel ini. Secara khusus kami mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM) dengan nomor kontrak 0419/C3/DT.05.00/2025 pada tanggal 22 Mei 2025 ; Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat dengan LLDIKTI wilayah V dengan Nomor Kontrak: 126/C3/DT.05.00/PL/2025 tanggal 28 Mei 2025 ; Universitas Ahmad Dahlan dengan nomor kontrak: 0498.12/LL5-INT/AL.04/2025 tanggal 4 Juni 2025 ; Direktorat Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat Kementerian Tinggi, Sains dan Teknologi Tahun Anggaran 2025 dengan Nomor Kontrak: 136/PT.LP/LPPM.UAD/V/2025 yang telah memberikan pendanaan untuk melangsungkan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Almusafir, R., & Smith, J. D. (2024). *Thermal Decomposition and Kinetic Parameters of Three Biomass Feedstocks for the Performance of the Gasification Process Using a Thermogravimetric Analyzer*.
- Asueta, A., Fulgencio-medrano, L., Miguel-fern, R., Leivar, J., Amundarain, I., Iruskieta, A., Arnaiz, S., Ignacio, J., & Lopez-urionabarrenechea, A. (2023). *A Preliminary Study on the Use of Highly Aromatic Pyrolysis Oils Coming from Plastic Waste as Alternative Liquid Fuels*. 1–15.
- Chao, C., Hong, C., Arifin, N. A., Hafiz, R. S. R. M., Salmiaton, A., Nomanbhay, S., & Shamsuddin, A. H. (2023). *Results in Engineering Co-pyrolysis of biomass and plastic : Circularity of wastes and comprehensive review of synergistic mechanism. Results in Engineering*, 17(February), 100989. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100989>
- Fujin, M., Habib, U., Noor, Z., & Asfandyar, S. (2023). *A Review on Catalytic Co-Pyrolysis of Biomass and Plastics Waste as a Thermochemical Conversion to Produce*. [https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en16145403](https://doi.org/10.3390/en16145403)
- Hasan, M. M., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., & Khan, M. M. K. (2023). *Characterization of pyrolysis oil produced from organic and plastic wastes using an auger reactor*. *Energy Conversion and Management*, 278(November 2022), 116723. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116723>
- Hua, D., Wu, Y., Chen, Y., Li, J., Yang, M., & Lu, X. (2015). *Co-pyrolysis behaviors of the cotton*

- straw/PP mixtures and catalysis hydrodeoxygenation of co-pyrolysis products over NI-MO/Al₂O₃ catalyst. *Catalysts*, 5(4), 2085–2097. <https://doi.org/10.3390/catal5042085>
- Idris, M., Setyawan, M., & Mufrodi, Z. (2024). Teknologi Insinerasi Sebagai Solusi Pengolahan Sampah Perkotaan dan Pemulihian Energi : A Review. *April*.
- Iriondo, A., & Acha, E. (2024). Quantification of the composition of pyrolysis oils of complex plastic waste by gas chromatography coupled with mass spectrometer detector †. 9892–9911. <https://doi.org/10.1039/d4ra00226a>
- Jos, F., Paloma, Á., & Garc, J. F. (2021). *Biodiesel and Other Value-Added Products from Bio-Oil Obtained from Agrifood Waste*.
- Khatibi, M., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2024). *Improving the Quality of Bio-oil Using the Interaction of Plastics and Biomass through Copyrolysis Coupled with Nonthermal Plasma Processing*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c04082>
- Lachos-perez, D., Missau, J., Anshu, K., & Siakpebru, O. K. (2023). *Review on Biomass Pyrolysis with a Focus on Bio-Oil Upgrading Techniques*. 182–205.
- Maulinda, L., Husin, H., Arahman, N., Rosnelly, C. M., Syukri, M., Nurhazanah, Nasution, F., & Ahmadi. (2023). *The Influence of Pyrolysis Time and Temperature on the Composition and Properties of Bio-Oil Prepared from Tanjung Leaves (Mimusops elengi)*. *Sustainability (Switzerland)*, 15(18), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su151813851>
- Mufrodi, Z., Syamsiro, M., Biddinika, M. K., Hakika, D. C., Prawisudha, P., & Budiasih, K. S. (2025). *Investigation and characterization of polypropylene plastic waste pyrolysis oil : Effect of temperature and fractional condensation*. 26(1), 163–172.
- Navarro, M. V., López, J. M., Veses, A., Callén, M. S., & García, T. (2018). *Kinetic study for the co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and plastics using the distributed activation energy model*. *Energy*, 165, 731–742. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.133>
- Olomo, E., Talai, S., Kiplagat, J., Manirambona, E., Muliwa, A., & Okino, J. (2024). *Helion Thermal and catalytic pyrolysis of automotive plastic wastes to diesel range fuel*. *Helion*, 10(20), e39576. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39576>
- Petrík, J., Genuino, H. C., Kramer, G. J., & Shen, L. (2025). *Pyrolysis of Dutch mixed plastic waste : Lifecycle GHG emissions and carbon recovery efficiency assessment*. <https://doi.org/10.1177/0734242X241306605>
- Riesco-avila, J. M., Vera-rozo, J. R., Rodr, D. A., Pardo-cely, D. M., & Ram, B. (2022). *Effects of Heating Rate and Temperature on the Yield of Thermal Pyrolysis of a Random Waste Plastic Mixture*.
- Rony, Z. I., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., & Hasan, M. M. (2025). *Energy Conversion and Management : X Properties of pyrolysis oils derived from different organic wastes for assessing their suitability for engine fuel*. *Energy Conversion and Management: X*, 25(January), 100875. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100875>
- Saatcioglu, K., & Venkatraman, P. D. (2024). *The environmental impact of end-of-life PVC flex banners and its potential upcycling opportunities*. *Waste Management Bulletin*, 2(3), 249–265. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.08.008>
- Sharma, M., Chaudhary, Y., Bhattacharai, P., & Upadhyay, B. (2024). *Energy Conversion and Management : X Optimizing pyrolysis and Co-Pyrolysis of plastic and biomass using Artificial Intelligence*. *Energy Conversion and Management: X*, 24(September), 100783. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100783>
- Silaen, J. A. F. (2024). *Regulatory Design Of Environmentally Friendly Election Campaigns In Encouraging The Realization Of Green Elections In Indonesia*. 72–83. <https://doi.org/https://doi.org/10.54477/LH.25192353.2024.4.pp.72-83>
- Sorino, D., Vizia, P. De, Baldelli, M., Bartolucci, L., Cordiner, S., & Falsetti, A. (2025). *Pyrolysis of mixed contaminated plastic wastes : Assessing the influence of polymers composition , temperature and residence time*. *Waste Management*, 201(October 2024), 114793. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114793>
- Stelmach, S., Ignasiak, K., Czardybon, A., & Bigda, J. (2023). *Evaluation of Bio-Oils in Terms of Fuel Properties*.
- Su, W., Li, Y., Man, P., Sheng, Y., & Wang, J. (2025). *Pyrolysis Kinetics and Gas Evolution of Flame-Retardant PVC and PE : A TG-FTIR-GC / MS Study*. 1–19.

- Sun, T., Chen, Z., Wang, R., Yang, Y., Zhang, L., Li, Y., Liu, P., & Lei, T. (2023). *Influences of the Reaction Temperature and Catalysts on the Pyrolysis Product Distribution of Lignocellulosic Biomass (Aspen Wood and Rice Husk)*. *Polymers*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/polym15143104>
- Syamsiro, M., Mufrodi, Z., Rafly, R., & Machmud, S. (2020). *Energy Recovery from Food Packaging Plastics by Thermal and Catalytic Pyrolysis Processes*. 8(1), 51–58. <https://doi.org/10.13189/ujme.2020.080107>
- Tian, Y., Han, M., Gu, D., Bi, Z., Gu, N., Hu, T., Li, G., Zhang, N., & Lu, J. (2024). *PVC Dechlorination for Facilitating Plastic Chemical Recycling: A Systematic Literature Review of Technical Advances, Modeling and Assessment*. *Sustainability (Switzerland)*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/su16198331>
- Wanignon, F., Steene, L. Van De, Kamenan, K., & Siaka, T. (2023). *Prediction of pyrolysis oils higher heating value with gas chromatography – mass spectrometry*. 96, 141–145. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.007>